

Миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на двойных спиральных полосковых резонаторах

Б. А. Беляев^{1, 2} ✉, А. М. Сержантов^{1, 2}, Ан. А. Лексиков³,
Я. Ф. Бальва³, Р. Г. Галеев^{1, 4}

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, Россия, 660037, г. Красноярск, ул. им. Газеты «Красноярский рабочий»

² Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, Проспект Свободный, 79

³ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, строение 38

⁴ АО НПП «Радиосвязь», Россия, 660021, г. Красноярск, ул. Декабристов 19

✉ belyaev@iph.krasn.ru

Аннотация

Разработана новая миниатюрная монолитная конструкция полосно-пропускающего фильтра, которая может изготавливаться по технологии многослойных печатных плат. Каждый резонатор в фильтре образован вставленными друг в друга металлическими спиралями левой и правой закрутки, у которых одна пара смежных концов замкнута на экран, а другая – свободна. Витки из полосковых проводников в форме одинаковых прямоугольных рамок выполнены на диэлектрических пластинах и располагаются в многослойной структуре строго друг под другом с чередованием витков левой и правой спиралей. Конструкция фильтра на таких многопроводниковых двуспиральных резонаторах имеет не только малые размеры, но и обладает высокой селективностью, что доказывают измеренные характеристики фильтра четвертого порядка, резонаторы которого изготовлены на пяти диэлектрических слоях из материала RO4350BTM. Центральная частота полосы пропускания фильтра $f_0 = 60$ МГц, ее относительная ширина $\Delta f / f_0 = 18 \%$, при этом размеры устройства $34 \times 16.5 \times 4.3$ мм³ ($0.007\lambda_0 \times 0.003\lambda_0 \times 0.001\lambda_0$, где λ_0 – длина волны в вакууме на частоте f_0). Фильтр обладает протяженной полосой заграждения, которая по уровню -38 дБ простирается до частоты $16f_0$.

Ключевые слова

полосно-пропускающий фильтр, резонатор, диэлектрическая пластина, полосковые проводники

Для цитирования

Беляев Б. А., Сержантов А. М., Лексиков Ан. А., Бальва Я. Ф., Галеев Р. Г. Миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на двойных

спиральных полосковых резонаторах. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):21–31. DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.002.

Miniaturized bandpass filter based on double spiral stripline resonators

**B. A. Belyaev^{1, 2} ✉, A. M. Serzhantov^{1, 2}, An. A. Leksikov³
Ya. F. Bal'va³, R. G. Galeev^{1, 4}**

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russia

² Siberian Federal University, 79 Svobodny Pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia

³ Kirensky Institute of Physics SB RAS, Akademgorodok 50, stroenie 38, Krasnoyarsk, 660036, Russia

⁴ JSC "Radiosvyaz", 19 Dekabristov Str., Krasnoyarsk, 660021, Russia

✉ belyaev@iph.krasn.ru

Abstract

A new miniature monolithic bandpass filter, which can be manufactured using multilayer standard all-PCB technology, is presented. Each resonator in the filter is formed by metal spirals of the left and right twist inserted into each other, in which one pair of adjacent ends is grounded, and the other is free. Spiral inductors have the form of identical rectangular frames and are designed on dielectric substrates, located on a multilayer structure strictly under each other with alternating turns of the left and right spirals. The design of the filter based on such multilayer double-spiral resonators is both small in size, and highly selective, which is proved by the measured characteristics of the fourth order filter fabricated at seven dielectric layers of RO4350B material. The filter has the central frequency of the passband $f_0 = 60$ MHz, and the fractional bandwidth $\Delta f / f_0 = 18\%$, while the size of the device is of the device are only $34 \times 16.5 \times 4.3$ mm³ ($0.007\lambda_0 \times 0.003\lambda_0 \times 0.001\lambda_0$, where λ_0 is the wavelength at the center frequency f_0). The filter has a wide stopband, which extends up to the frequency of $16f_0$ at a level of -38 dB.

Keywords

bandpass filter, resonator, dielectric plate, stripline resonators

For citation

Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Leksikov An. A., Bal'va Ya. F., Galeev R. G. Miniaturized bandpass filter based on double spiral stripline resonators. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):21–31. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.002.

Миниатюризация частотно-селективных сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств и, в частности, фильтров является важной и всегда актуальной задачей радиотехники. При этом развитие современных систем связи, радиолокации, радионавигации,

специальной и измерительной радиоаппаратуры требует уменьшения габаритов и одновременного улучшения электрических характеристик таких устройств, а также высокую технологичность их изготовления и низкую стоимость при массовом производстве. В значительной степени всем этим требованиям отвечают микрополосковые и полосковые конструкции [1–3], поэтому они находят очень широкое применение в СВЧ-технике. Отметим, что в дециметровом, и особенно в метровом, диапазонах длин волн проблема миниатюризации фильтров по своей важности нередко ставится на первое место. Однако при разрешении этой проблемы исследователи сталкиваются с большими трудностями, связанными с существенным ухудшением характеристик фильтров.

Традиционно проблема миниатюризации полосковых конструкций решается различным сворачиванием проводников, например в форму шпильки [4; 5], спирали или меандра [6–8], а также созданием квазисосредоточенных элементов [9; 10]. При этом практически все названные способы миниатюризации хотя и приводят к уменьшению размеров устройств, но сопровождаются снижением собственной добротности резонаторов, что соответственно ухудшает частотно-селективные свойства фильтров. Рекордно высокую собственную добротность полосковые и микрополосковые резонаторы имеют, если их проводники изготовлены из пленок высокотемпературных сверхпроводящих материалов [11], но большая стоимость и необходимость использования криогенных температур ограничивает их широкое применение. К наилучшим полосковым и микрополосковым резонаторам по совокупности таких характеристик, как миниатюрность, величина собственной добротности и технологичность, в производстве можно отнести многопроводниковые конструкции [12–14]. Однако на частотах метрового диапазона длин волн фильтры даже на таких резонаторах имеют неприемлемо большие размеры, в сравнении, например, с фильтрами на сосредоточенных элементах. В настоящей работе исследована новая конструкция полоскового многопроводникового двуспирального резонатора, отличающаяся существенно меньшими размерами по сравнению со всеми известными миниатюрными полосковыми и микрополосковыми конструкциями.

Исследуемый резонатор состоит из двух спиралей левой и правой закрутки, вставленных друг в друга (рис. 1). Витки спиралей образованы полосковыми проводниками с фиксированной шириной 1 мм, сформированными на поверхностях пяти диэлектрических пластин толщиной h , которые не показаны,

чтобы не загромождать рисунок. Спирали имеют по три витка в виде одинаковых прямоугольных рамок с размерами окна w и W , при этом рамки в конструкции резонатора располагаются строго друг под другом с чередованием витков левой и правой спиралей. Для этого используются соединения соответствующих витков в каждой спирали посредством металлизированных отверстий в диэлектрических пластинах. Одна пара смежных концов спиралей соединена с экраном, другая – свободна. Эта пятислойная структура размещается между двумя дополнительными диэлектрическими слоями толщиной H (на рисунке не показаны), наружные поверхности которых металлизированы и играют роль экранов.

Благодаря взаимному расположению витков многослойных спиралей в рассматриваемой конструкции резонатора, на его нижней моде колебаний напряжения на разомкнутых концах проводников противоположны по знаку, а токи имеют одинаковый знак во всех проводниках спиралей, то есть текут в одном направлении. Очевидно, что эквивалентную схему такого резонатора можно представить в виде колебательного контура, емкость которого подключена к двум взаимодействующим индуктивностям, противоположные концы которых соединены с экраном. Очевидно также, что величина индуктивностей спиралей, существенно увеличенная за счет взаимной индукции, не только сильно понизит резонансную частоту контура, но и повысит его собственную добротность, как это имеет место в многопроводниковом резонаторе другой конструкции [15].

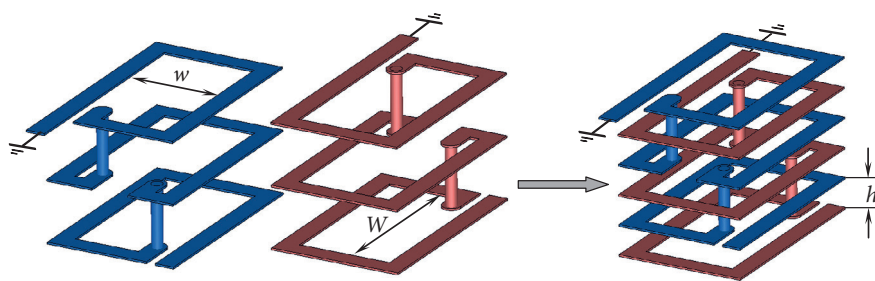


Рис. 1. Конструкция двуспирального полоскового резонатора

Fig. 1. Double spiral stripline resonator structure

Исследование влияния основных конструктивных параметров резонатора на резонансную частоту его первой моды колебаний f_1 , на собственную добротность резонанса Q_1 и на отношение резонансных частот второй моды колебаний к первой f_2 / f_1 , которое, как известно, определяет протяженность поло-

сы заграждения фильтра, проводилось численным электродинамическим анализом 3D-модели рассматриваемой конструкции. На рис. 2 представлены зависимости частот первой моды колебаний двуспирального резонатора (сплошные линии) и отношений f_2 / f_1 (штриховые линии), построенные от толщины диэлектрических слоев h (при фиксированном суммарном количестве витков в двух спиралях $N = 6$) и от количества витков в двух спиралях N (при фиксированном $h = 0.102$ мм). Зависимости рассчитывались для полосковых структур, закрытых сверху и снизу диэлектрическими слоями толщиной $H = 1.524$ мм, металлизированными снаружи. В конструкции резонатора все диэлектрические слои из материала RO4350B™ с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3.66$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0.0037$. В многослойных спиралях размеры окна плоских витков в форме прямоугольных рамок (см. рис. 1) $W = 12.0$ мм и $w = 5.2$ мм, а образующие их медные полосковые проводники толщиной 18 мкм имели ширину 1 мм.

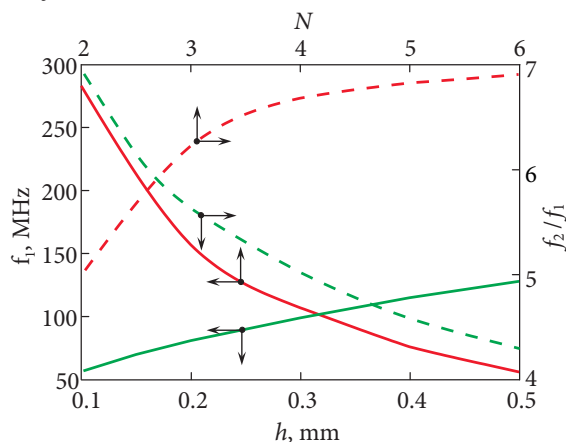


Рис. 2. Зависимости частоты первой моды колебаний f_1 (сплошные линии) и отношения f_2 / f_1 (штриховые линии) от толщины диэлектрических слоев h при суммарном количестве витков в спиралях $N = 6$ и от N при $h = 0.102$ мм

Fig. 2. Frequency dependences of the first oscillation mode f_1 (solid lines) and the f_2 / f_1 ratio (dashed lines) versus the thickness of the dielectric layers h for the total number of spiral turns $N = 6$ and versus N for $h = 0.102$ mm

Исследования показали, что с уменьшением толщины слоев и с увеличением количества витков в спиралях частота нижней (рабочей) моды колебаний резонатора f_1 быстро уменьшается. Очевидно, что при фиксированной резонансной частоте эти действия приведут к значительному уменьшению размеров кон-

струкции. На рис. 2 видно, что при толщине слоев $h = 0.102$ мм с увеличением количества витков в спиральных с двух до шести частота f_1 уменьшается в ~ 5.7 раза, а отношение f_2/f_1 увеличивается с 5 до 6.9. Видно также, что с уменьшением h в пределах 0.5–0.1 мм частота f_1 для резонатора с суммарным количеством витков $N = 6$ монотонно падает от 130 почти до 50 МГц, а отношение f_2/f_1 растет с 4.1 до 6.9. Однако важно отметить, что зависимость $f_2/f_1(N)$ быстро выходит на насыщение, поэтому в полосно-пропускающем фильтре на двуспиральных резонаторах увеличение количества витков в спиральных свыше 6 не приведет к заметному расширению высокочастотной полосы заграждения.

Исследования собственной добротности Q_1 от толщины диэлектрических слоев h и отношения сторон прямоугольной спирали W/w (см. рис. 1) проводились на фиксированной частоте $f_1 = 60$ МГц двуспирального резонатора с $N = 6$. При этом для каждого значения h , изменяющихся в пределах 0.5–0.1 мм, и отношений W/w , изменяющихся в пределах 1–3, частота f_1 настраивалась пропорциональным изменением размеров w и W . Обнаружено, что варьирование конструктивных параметров в указанных пределах не приводит заметному изменению собственной добротности резонатора $Q_1 \approx 100$. Заметим, что на частоте 60 МГц толщина металлизации (18 мкм) сравнима с толщиной скин-слоя, поэтому основные потери в резонаторе обусловлены исключительно омическими потерями. Заметим, что при размерах окна плоских витков $W = 12.0$ мм и $w = 5.2$ мм габариты резонатора очень малы: $15.5 \times 7.2 \times 4.3$ мм³, то есть наибольший размер конструкции в 320 раз меньше длины волны в вакууме на частоте резонанса.

Как известно, относительная ширина полосы пропускания фильтра определяется величиной коэффициентов связи его резонаторов, которая зависит от расстояния между ними. При разработке миниатюрных конструкций фильтров целесообразно использовать такое взаимное расположение резонаторов, которое обеспечит минимальное расстояние между ними при заданной ширине полосы пропускания. На рис. 3 представлены зависимости коэффициентов связи от расстояния S между парами двуспиральных резонаторов с $N = 6$, построенные для трех вариантов их взаимного расположения. Конструктивные параметры резонаторов были следующими: $h = 0.102$ мм, $H = 1.524$ мм, $W = 12.0$ мм и $w = 5.2$ мм. Величина коэффициента связи резонаторов находилась непосредственно из частотной зависимости коэффициента передачи взаимодействующих резонаторов при их слабой связи с внешними линиями передачи, как, на-

пример, в работе [2]. Представленные зависимости показывают, что наименьший зазор для любой фиксированной величины коэффициента связи резонаторов обеспечивает третий вариант их взаимного расположения, а наибольший зазор – первый вариант. Отметим, что невозможно реализовать фильтр высокого порядка, используя только один вариант взаимной ориентации резонаторов.

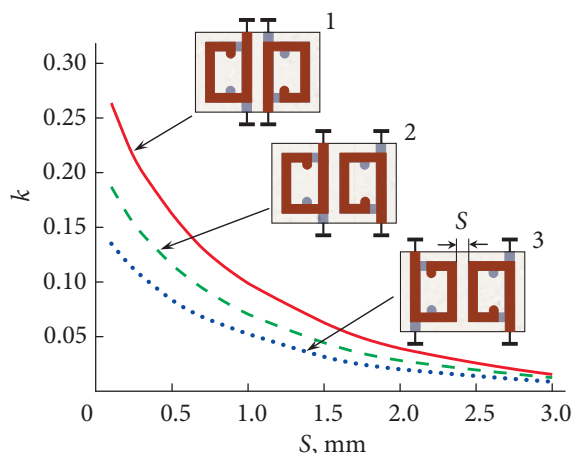


Рис. 3. Зависимости коэффициентов связи для трех пар двуспиральных резонаторов различной конфигурации от расстояния между ними

Fig. 3. Dependences of the coupling coefficients for three pairs of double-spiral resonators of different configurations on the distance between them

Экспериментальная проверка работоспособности предложенной конструкции резонатора проводилась на полосно-пропускающем фильтре четвертого порядка с волновым сопротивлением портов 50 Ом. Для определенности центральная частота полосы пропускания фильтра задана $f_0 = 60$ МГц, а ее относительная ширина по уровню -3 dB $\Delta f / f_0 = 18$ %. Конструктивные параметры резонаторов в фильтре указаны выше, но в нем для соединения диэлектрических слоев добавлены слои препрега RO4450TTM толщиной 91 мкм ($\epsilon_r = 3.52$, $\text{tg} \delta = 0.0041$). Величина зазоров S между резонаторами находилась параметрическим синтезом конструкции фильтра с использованием численного электродинамического анализа его 3D-модели (рис. 4). Для уменьшения размеров фильтра конфигурация крайних пар резонаторов выбрана по варианту 2 (см. рис. 3), а средней пары – по варианту 3. Синтез определил величину зазоров между крайними резонаторами 0.70 мм, а между средними 0.65 мм.

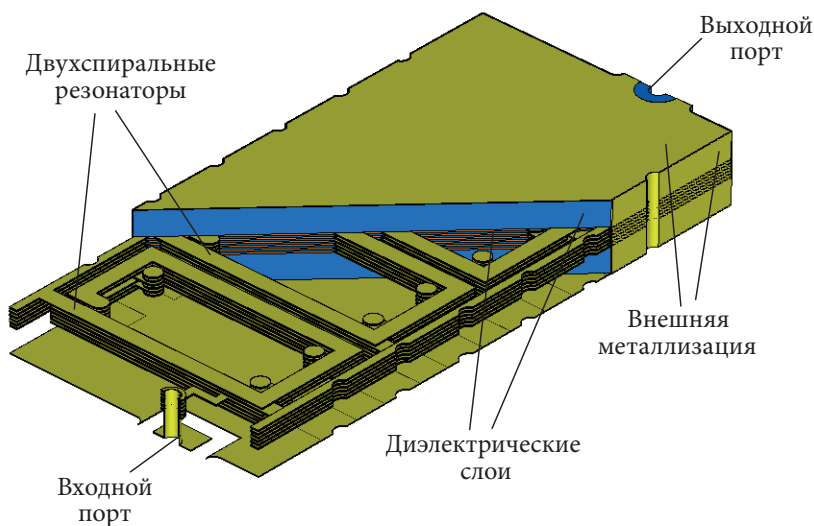


Рис. 4. Конструкция фильтра четвертого порядка в монолитном исполнении

Fig. 4. Monolithic 4-pole filter design

Синтезированный фильтр был изготовлен по технологии многослойных печатных плат с применением фотолитографии. Размеры фильтра составляют $34 \times 16.5 \times 4.3 \text{ мм}^3$ или в длинах волн λ_0 в вакууме на центральной частоте полосы пропускания $0.007\lambda_0 \times 0.003\lambda_0 \times 0.001\lambda_0$, масса фильтра – всего 5.0 г. Измеренные частотные зависимости прямых $S_{21}(f)$ и обратных $S_{11}(f)$ потерь экспериментального образца фильтра показаны точками на рис. 5а, сплошной линией показаны расчетные зависимости. Фотографии фильтра (вид снизу и вид сверху) представлены на рис. 5б. Видно, что рассчитанные частотные зависимости прямых $S_{21}(f)$ и обратных потерь $S_{11}(f)$ достаточно хорошо совпадают с измеренными. Фильтр имеет центральную частоту полосы пропускания $f_0 = 60 \text{ МГц}$ при относительной ширине полосы пропускания по уровню -3 дБ $\Delta f / f_0 = 18 \%$. Измеренное минимальное вносимое затухание в полосе пропускания фильтра составило 2.9 дБ при максимальном уровне отражений в ней -15 дБ . Следует отметить, что вносимое затухание в полосе пропускания фильтра можно существенно уменьшить, если увеличить толщину проводников до нескольких толщин скин-слоя на центральной частоте и использовать диэлектрики с меньшим значением диэлектрических потерь. Важным достоинством исследованного фильтра является протяженная высокочастотная полоса заграждения, верхний край которой по уровню -38 дБ простирается до частоты $16 f_0$.

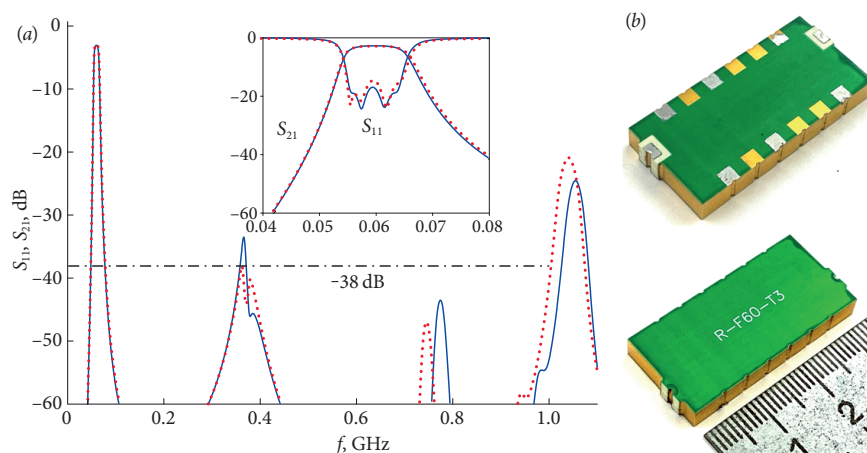


Рис. 5. Рассчитанные (сплошная линия) и измеренные (точки) АЧХ макета фильтра (а), а также фотография изготовленного фильтра (б)

Fig. 5. Calculated (solid line) and measured frequency response (dotted line) of the filter (a), as well as a photograph of the manufactured filter (b)

Таким образом, в работе исследован миниатюрный полосковый полотно-пропускающий фильтр в монокристаллическом исполнении, изготовленный по технологии многослойных печатных плат. Миниатюрность и высокие частотно-селективные свойства фильтра обусловлены использованием в нем новой конструкции многослойного полоскового двуспирального резонатора, который на частоте первой моды колебаний $f_1 = 60$ МГц имеет длину в 320 раз меньше длины волны в вакууме. Разработанная конструкция обеспечивает не только хорошие массогабаритные показатели, высокие частотно-селективные свойства, к которым прежде всего следует отнести протяженную полосу заграждения, но и как показали измерения серии из 10 опытных образцов отличную повторяемость характеристик таких устройств при тиражировании.

Благодарности

Финансирование работы: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России по госзаданию № FEFE-2020-0013 «Развитие теории самоконфигурирующихся алгоритмов машинного обучения для моделирования и прогнозирования характеристик компонентов сложных систем».

Acknowledgments

This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state assignment no. FEFE-2020-0013 “Development of the Theory of Self-Configurable Machine-Learning Algorithms for Simulating and Predicting Characteristics of Complex Systems.”

Список литературы / References

1. Morgan M. A. *Reflectionless Filters*. Boston, London: Artech House Microwave Library; 2017. 277 p.
2. Lei Zhu, Sheng Sun, Rui Li. *Microwave Bandpass Filters for Wideband Communications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken; 2012. 221 p.
3. Hong J.S., Lancaster M.J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. N.Y., Chichester; Wein heim; Brisbane; Singapore; Toronto: Wiley; 2001.
4. Belyaev B. A., Voloshin A. S., Morozov N. V., Galeev R. G. Broadband Microstrip Antenna with a Hairpin Bandpass Filter. *Technical Physics Letters*. 2015;41(3):238–241. DOI: 10.1134/S1063785015030025.
5. Leksikov A. A., Serzhantov A. M., Govorun I. V., Afonin A. O., Ugryumov A. V., Leksikov A. A. Miniaturized Suspended-Substrate Two-Conductors Resonator and a Filter on its Base. *Progress in Electromagnetics Research M*. 2019;84:127–135. DOI: 10.2528/pierm19060604.
6. Gye-An Lee, M. A. Megahed F. De Flaviis. Low-cost compact spiral inductor resonator filters for system-in-a-package. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 2005;28(4):761–771. DOI: 10.1109/tadvp.2005.850504.
7. Maric A. M., Radosavljevic G. J., Smetana W., Zivanov L. D. Comparison of LTCC inductors on different substrate configurations with PCB inductor. *Microelectronics International*. 2013;31(1):32–41. DOI: 10.1108/mi-04-2013-0017.
8. Belyaev B. A., Khodenkov S. A., Galeev R. G., Shabanov V. F. Investigation of Microstrip Structures of Wideband Bandpass Filters. *Doklady Physics*. 2015;60(3):95–101. DOI: 10.1134/s1028335815030015.
9. Menzel W., Balalem A. Quasi-Lumped Suspended Stripline Filters and Diplexers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2005;53(10):3230–3237. DOI: 10.1109/tmtt.2005.855139.
10. Belyaev B. A., Leksikov A. A., Serzhantov A. M., Tyurnev V. V. Highly Selective Suspended Stipline Dual-Mode Filter. *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2011;25:57–66. DOI: 10.2528/pier11053001.
11. Sitnikova M. F., Vendik I. B., Vendik O. G., Kholodnyak D. V., Tural'chuk P. A., Kolmakova I. V., Belyavskii P. Yu., Semenov A. A. Modeling and experimental investigation of microstrip resonators and filters based on High-Temperature Superconductor films. *Technical Physics Letters*. 2010;36(9):862–864. DOI: 10.1134/s1063785010090257.
12. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Leksikov A. A., Bal'va Y. F., Leksikov An. A. Multilayred multiconductor stripline resonator and its application to bandpass filter with wide stopband. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2017;59(9):2212–2216. DOI: 10.1002/mop.30706.
13. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Bal'va Ya. F., Leksikov A. A., Galeev R. G. A New Design of a Miniature Microstrip Resonator with Interdigital Structure. *Technical Physics Letters*. 2014;40(11):1010–1013. DOI: 10.1134/s1063785014110194.

14. Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Tyurnev V.V., Bal'va Y.F., Leksikov A. A. Planar Bandpass Filter with 100-dB Suppression Up to Tenfold Passband Frequency. *Progress in Electromagnetics Research C*. 2014;48:37–44. DOI: 10.2528/pierc14013003.

15. Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Leksikov A.A., Bal'va Y.F., Leksikov An.A. High-Quality Compact Interdigital Microstrip Resonator and Its Application to Bandpass Filter. *Progress in Electromagnetics Research C*. 2017;72:91–103. DOI: 10.2528/pierc16101303.

Информация об авторах

Беляев Борис Афанасьевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель России, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева; Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

Сержантов Алексей Михайлович, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева; Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия.

Лексиков Андрей Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия.

Бальва Ярослав Федорович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия.

Галеев Ринат Гайсеевич, доктор технических наук, генеральный директор АО «НПП «Радиосвязь»; Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия.

Information about the authors

Boris A. Belyaev, Doctor of Technical Science, Professor, Honored Inventor of Russia, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Alexey M. Serzhantov, Doctor of Technical Science, Associate Professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Andrey A. Leksikov, Candidate of Technical Science, Senior Researcher, Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia.

Yaroslav F. Bal'va, Candidate of Physical and Mathematical Science, Researcher, Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia.

Rinat G. Galeev, Doctor of Technical Science, General Director of JSC “Radiosvyaz”, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia.

Поступила / Received: 01.03.2021

Принята в печать / Accepted: 18.03.2021